

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СУШКИ ПРИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОДВОДЕ ЭНЕРГИИ

Бурдо О.Г., д.т.н., профессор, Бандура В.Н., к.т.н., доцент, Яровой И.И., аспирант
Одесская национальная академия пищевых технологий

В работе рассмотрены проблемы моделирования процессов сушки при электромагнитном подводе энергии. Учитываются бародиффузионные процессы переноса влаги из объема продукта. На основе теории подобия система дифференциальных уравнений преобразована в уравнения в обобщенных переменных. Введено число энергетического воздействия, которое учитывает эффективность электромагнитного подвода энергии и бародиффузионных процессов переноса влаги из продукта.

The problem of modeling the drying processes at electromagnetic power supply has been considered in paper. Barodiffusion processes of moisture transport from product bulk are taken into account. On the basis of theory of similarity the system of differential equations has been transformed into generalized variables equations. The number of energy effect which takes account of the efficiency of electromagnetic power supply and moisture transport from the product.

Ключевые слова: сушка, математическое моделирование, электромагнитное излучение, бародиффузия.

Последние годы характеризуются бурным развитием сушильной техники с электромагнитными источниками энергии (ЭИЭ). Вместе с тем, совершенствование разработок ведется на основе инженерной интуиции. Уровень понимания процессов взаимодействия продукта и электромагнитных волн значительно ниже представлений электрофизических явлений в генераторах электромагнитного излучения. Техника электромагнитных генераторов опередила теорию тепломассопереноса в процессе сушки при электромагнитном подводе энергии. Объясняется это тем, что сами генераторы (особенно микроволнового диапазона) являются элементами военной техники, их совершенствование и проводилось под заказы этой отрасли. Если учесть, что прикладные проблемы даже традиционной сушки не доведены до общепризнанных инженерных методов проектирования, то специфика сушки при электромагнитном подводе энергии практически не изучена. Однако успешное моделирование процессов сушки с ЭИЭ может дать мощный импульс широкого внедрения перспективной техники в пищевые технологии.

Физическая схема сушки с ЭИЭ. Наибольший практический интерес представляют ленточные сушильные установки, где продукт обрабатывается в тонком слое. Физическая схема сушки приведена на рис.1. Продукт движется с помощью ленты со скоростью w . Скорость воздуха относительно продукта составляет v , а зазор канала его движения δ_B .

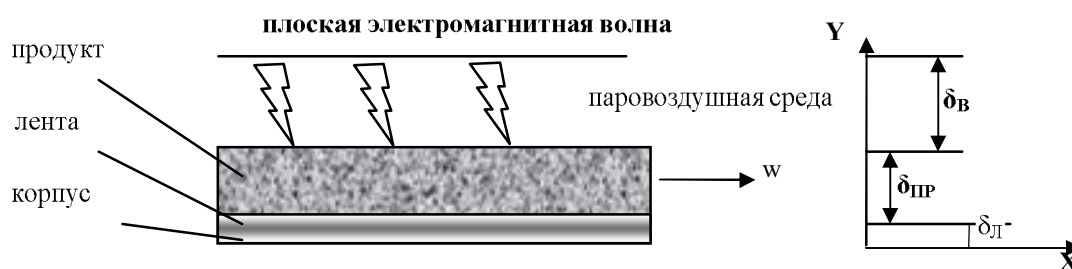


Рис.1 – Схема процесса обезвоживания при действии электромагнитного генератора

Поскольку воздушная среда, которая прокачивается через канал над продуктом, для электромагнитных волн практически прозрачна. Энергию излучения поглощает слой продукта, толщина которого $\delta_{ПР}$. Поэтому можно считать, что в слое продукта действует объемный источник, мощность которого N , а удельная объемная плотность q_V . Лента транспортера, толщина которой $\delta_{Л}$, может быть радиопрозрачной, либо связанной электрически с корпусом, т.е. поглощение энергии излучения в ленте отсутствует. Вместе с тем, она взаимодействует при граничных условиях IV рода с нагретым продуктом. Поверхность

продукта взаимодействует при граничных условиях III рода с потоком воздуха. Воздух, принимая влагу продукта, увлажняется и нагревается, если его температура ниже, чем температура продукта. Особенно-стью электромагнитного подвода энергии является то, что максимальные значения и температуры и вла-госодержания расположены внутри продукта. Это отличие от традиционных (конвективных и кондукти-вных) способов подвода энергии позволяет существенно снизить затраты энергии на обезвоживание [1]. Уровень энергетических затрат зависит от согласования параметров электромагнитного поля, структуры продукта, скорости его перемещения и параметров воздушной среды. Ключевое влияние имеет схема иницирования потока влаги из продукта при максимальных значениях движущей силы процесса влаго-переноса.

Движущая сила и кинетика процессов диффузионно – фильтрационного влагопереноса. Современные представления механизма обезвоживания при сушке базируются на научных основах тепломас-сопереноса при фазовых переходах [2 - 5] и на теории П.А.Ребиндера о формах связи влаги с коллоид-ными и капиллярно-пористыми материалами. Внешние воздействия различной физической природы (энергетические, концентрационные, гидродинамические, электромагнитные и т.п.) формируют в проду-кте поля температур, давлений, влагосодержаний. Комбинированное влияние соответствующих движу-щих сил определяет развитие гидродинамических, тепловых и массообменных процессов. Теория суш-ки, основы которой заложены А.В.Лыковым [2], определяет поток влаги внутри пористого материала следующим выражением:

$$j = -(D\rho_c \nabla U + D\delta\rho_c \nabla t + K_p \nabla P) \quad (1)$$

где $\nabla U, \nabla t, \nabla P$ – градиенты, соответственно, влагосодержания, температуры и давления; δ - относи-тельный коэффициент термодиффузии (кг/кгК); K_p – коэффициент фильтрационного (молярного) пере-носа (кг/м *с*Па).

Специфика многообразных задач сушки объясняется молекулярным натеканием газа по микрока-пиллярам (эффузия), диффузией скольжения (поток парообразной влаги, переносимой при помощи теп-лового скольжения), циркуляцией газа в макропорах (естественная конвекция). Трудно понять термин “концентрационная диффузия” применительно к потоку влаги внутри твердого капиллярно-пористого тела. Если существует такой процесс, то он должен подчиняться уравнению Фика, характеризоваться соответствующим коэффициентом диффузии. Вместе с тем, коэффициенты диффузии воды непосредст-венно в твердых водонерастворимых структурах не определялись, ясно, что их величины ничтожно малы для заметного влияния на кинетику сушки. Очевидно, понятием “концентрационная диффузия” подме-няется результат сложного гидравлического перераспределения влаги внутри тела в системе параллель-ных капилляров, вызванного процессом парообразования в макрокапиллярах и перекачкой жидкости в микрокапилляры.

Система А.В.Лыкова справедлива для любого вида влаго – теплопереноса, но имеет очень серьезное ограничение: феноменологические коэффициенты K_{ij} должны быть постоянными. Поэтому, общая мо-дель реализуется только для крайне ограниченных случаев [1] удобна лишь для качественного анализа механизма процесса сушки и не нашла практического применения.

Система уравнений А.В.Лыкова в ряде случаев дополнялась, например П.П.Луциком соотношением, учитывающим деформации и механические напряжения твердых капиллярно-пористых тел [5].

Усилия большинства ученых в области сушки были направлены на экспериментальное моделирова-ние процессов, разработке методов расчета кинетики сушки. Определилась тенденция все большего ограничения в моделях видов объектов и продуктов. Оправданием являлось повышение точности моде-ли. Наконец, стали использовать регрессионные модели, описывающие массивы экспериментальных данных. Точность таких моделей определялась погрешностями экспериментальных данных, возможнос-тями математического аппарата и оказывалась вполне приемлемой для инженерных задач. Однако, эти модели справедливы только для условий опытов и для исследованного объекта, т.е. не распространяются на класс даже подобных задач, не могут быть использованы для постановки задач прогнозирования и оптимизации даже исследованного аппарата.

Таким образом, теория сушки не может эффективно использовать огромный по объему эксперимен-тальный материал. Общие модели не точны, а точные регрессионные модели не могут дать никакой но-вой информации.

Представляется, что возникшие при описании процесса сушки проблемы объясняются тем, что все авторы, сторонники феноменологического подхода, рассматривают сушку как некий один процесс с по-стоянными коэффициентами переноса и формируют модели из этих предположений.

В работе [1] выдвигается гипотеза, что сушка – это результат действия на принципе суперпозиции, по меньшей мере, трех процессов, что иллюстрируется рис.2.



Рис. 2 – Структурная схема процессов при сушке

В соответствии с таким подходом преобразуются граф тепловлагопереноса и система уравнений А.В.Лыкова. Рассматриваются самостоятельно поверхностная влага U_p , капиллярная влага U_k и абсорбционно связанная влага U_A (рис.3).

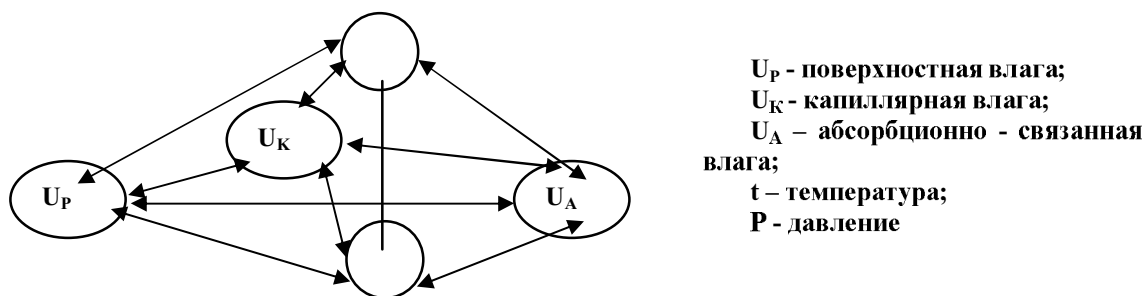


Рис. 3 – Граф предлагаемой схемы сушки

В соответствии с рис.3 преобразуется и система уравнений А.В.Лыкова:

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{\partial U_p}{\partial \tau} &= K_{11} \nabla^2 U_p + K_{12} \nabla^2 U_k + K_{13} \nabla^2 U_A + K_{14} \nabla^2 t + K_{15} \nabla^2 P \\
 \frac{\partial U_k}{\partial \tau} &= K_{21} \nabla^2 U_p + K_{22} \nabla^2 U_k + K_{23} \nabla^2 U_A + K_{24} \nabla^2 t + K_{25} \nabla^2 P \\
 \frac{\partial U_A}{\partial \tau} &= K_{31} \nabla^2 U_p + K_{32} \nabla^2 U_k + K_{33} \nabla^2 U_A + K_{34} \nabla^2 t + K_{35} \nabla^2 P \\
 \frac{\partial t}{\partial \tau} &= K_{41} \nabla^2 U_p + K_{42} \nabla^2 U_k + K_{43} \nabla^2 U_A + K_{44} \nabla^2 t + K_{45} \nabla^2 P \\
 \frac{\partial P}{\partial \tau} &= K_{51} \nabla^2 U_p + K_{52} \nabla^2 U_k + K_{53} \nabla^2 U_A + K_{54} \nabla^2 t + K_{55} \nabla^2 P
 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Система уравнений (2) сложнее, чем система А.В.Лыкова, но она позволяет обосновать выдвинутую гипотезу о суперпозиции действия нескольких процессов при сушке. Каждый из этих процессов характеризуется своим значением движущей силы и кинетическим коэффициентом скорости процесса. В пределах своего процесса эти параметры могут приниматься одинаковыми, а для разных процессов существенно отличаются. Каждый из трех процессов подчиняется своим законам переноса, и реализуются за счет разных механизмов (табл.1).

Таблица 1 – Характеристика основных процессов при сушке

№	Процесс	Механизм процесса	Движущая сила процесса	Кинетический коэффициент
1	Испарение влаги с поверхности	Конвективная диффузия	$a_k P_{II} - P_B$	β_k
2	Испарение влаги внутри капилляров, пор	Конвективная диффузия в стесненных условиях	$a_c P_{II} - P_B$	β_c
3	Десорбция влаги	Конвективная диффузия	$a_d P_{II} - P_B$	β_d

Выдвинутая гипотеза [1] не противоречит фундаментальным представлениям физики влажного капиллярно–пористого тела. Общепризнанна схема П.А.Ребиндера форм связи влаги. Удаление влаги разных форм связи – это разные процессы со своими коэффициентами переноса, со своим потенциалом, движущей силой (табл.1). Попытка коррекции движущей силы с помощью показателя активности воды a_i известна в мировой практике [5].

Математическая модель сушки при электромагнитном подводе энергии. В соответствии с физической схемой (рис.1) и представлениями (рис.3) формулируется математическая модель. В области действия электромагнитного излучения уравнение энергии примет вид:

$$c\rho_0 \frac{\partial t}{\partial \tau} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} t) + r\gamma\rho_0 \frac{\partial U}{\partial \tau} + N_{\text{Э}} \quad (3)$$

в соотношении (3) приняты обозначения: c – теплоемкость продукта; ρ – плотность сухой части продукта; r – теплота фазового перехода воды в пар; γ – доля воды, которая перешла в пар; $N_{\text{Э}}$ – объемная плотность внутренних источников теплоты (соответствующая поглощению проникающего электромагнитного излучения).

В этой же области кинетика влагопереноса определяется соответствующими движущими силами. Как правило, интерес представляют процессы удаления поверхностной и капиллярной влаги:

$$\frac{\partial U_P}{\partial \tau} = \operatorname{div}(D_P \operatorname{grad} U_P) \quad (4)$$

$$\frac{\partial U_K}{\partial \tau} = \operatorname{div}(D_T \operatorname{grad} T + D_B \operatorname{grad} P_K) \quad (5)$$

где, D_P , D_T , D_B – коэффициенты, соответственно, конвективной диффузии, термодиффузии и бародиффузии.

Применительно к ленточной сушилке (рис.1) уравнения (3...5) с соответствующими уравнениями связи следует записать для всех n зон активной длины сушильной камеры L_A . В каждой зоне действует свой источник электромагнитной энергии – N_i .

$$\sum_{i=1}^n x_i = L_A; \quad i = 1, 2, 3 \dots n$$

$$\sum_{i=1}^n N_i = N_{\text{Э}} \quad i = 1, 2, 3, \dots n \quad (6)$$

В пределах одной зоны запишем соответствующие зависимости при следующих допущениях:

В начальный момент времени температуры продукта ($t_{\text{П}}$), стенки ($t_{\text{СТ}}$) и всех конструктивных элементов установки является одинаковой и равной температуре окружающей среды ($t_{\text{ОС}}$).

Физические параметры продукта в пределах каждой зоны постоянны и принимаются в балансовых моделях как средние значения ($t_{\text{П}}$ - средняя температура продукта в анализируемой зоне, $U_{\text{П}}$ - его влагосодержание).

Расход воздуха (L_B), продукта ($G_{\text{П}}$) и мощность излучения (N) в пределах каждой зоны постоянны.

Скорость движения ленты (w) постоянна, т.е. удельная нагрузка на поверхность ленты в пределах каждой зоны постоянны.

Рассматриваемый процесс является квазистационарным.

Теплопроводностью в слое продукта вдоль оси X можно пренебречь.

На поверхности продукта величина гидродинамического пограничного слоя равна толщине пограничного теплового и диффузионного слоев.

При сформулированных допущениях на верхней поверхности сушилки ($y = y_B$):

$$\begin{aligned} \text{при } \tau = 0, & \quad t_{\text{СТ}} = t_{\text{ОС}}, & \quad N = 0 \\ \text{при } \tau > 0, & \quad \text{ГУ II рода,} & \quad N = N_i = \text{const}; \end{aligned} \quad (7)$$

Для воздушного канала, $u_{\text{П}} < y \leq y_B$

Для потока воздуха:

$$\begin{aligned} \text{при } \tau = 0, & \quad t_B = t_{\text{ОС}}, \\ \text{при } \tau > 0, & \end{aligned}$$

$$Q_B = L_B (i_0 - i_1) = \alpha_B F_i (t_{\text{П}} - t_B); \quad F_i = l_i \quad (8)$$

За счет потока влаги из продукта происходит его увлажнение:

$$L_B (X_0 - X_1) = J \quad (9)$$

Гидродинамику воздушного потока отражает уравнение Навье – Стокса в одномерном приближении:

$$\rho_B v_B \frac{\partial v_B}{\partial x} = \rho_B g - \frac{\partial P_B}{\partial x} + \mu_B \frac{\partial^2 v_B}{\partial x^2} \quad (10)$$

В соотношениях (8, 9, 10): α_B – коэффициент теплоотдачи от продукта к потоку воздуха, i_0, i_1 – энтальпии воздуха на входе и выходе зоны, F_i – площадь поверхности продукта, b_i – его ширина, l_i – его длина в пределах зоны, J – поток влаги из продукта, v – относительная (продукта) скорость воздуха, P_B – давление воздуха, g – гравитационная константа, ρ_B – плотность воздуха, μ_B – динамический коэффициент вязкости воздуха, Q_B – теплообмен между продуктом и воздухом.

Основные процессы происходят в объеме продукта $y_{\text{Л}} < y \leq y_{\text{П}}$.

при $\tau = 0, \quad t_{\text{П}} = t_{\text{ос}},$

при $\tau > 0,$

Для слоя продукта уравнение Фурье – Кирхгофа:

$$\frac{\partial t_{\text{П}}}{\partial \tau} = a_{\text{П}} \left(\frac{\partial^2 t_{\text{П}}}{\partial x^2} + \frac{\partial t_{\text{П}}}{\partial y^2} \right) \quad (11)$$

при ГУ III рода на границе $y = y_{\text{П}}$:

$$-\lambda_{\text{П}} \left(\frac{\partial t_{\text{П}}}{\partial y} \right) - \alpha_B (t_{\text{П}} - t_B) = 0 \quad (12)$$

Энергетический баланс в слое продукта учитывает нагрев сухой части (Q_C) и влаги (Q_U), перевода в пар части (γ) жидкости ($Q_{\text{Ж}}$), теплообмен с воздухом (Q_B), лентой транспортера ($Q_{\text{Л}}$) и поглощение проникающего электромагнитного излучения ($N_{\text{Э}}$).

$$Q_C + Q_U + Q_{\text{Ж}} + Q_B + Q_{\text{Л}} + N = 0 \quad (13)$$

или

$$G_C c_{P_C} (\Delta t_{\text{П}_i}) + G_U c_{P_U} (\Delta t_{\text{П}_i}) + r \gamma G_U + L_B (\Delta i_B) + Q_{\text{Л}} + N_{\text{Э}} b \delta_{\text{П}} l_i = 0 \quad (14)$$

Поток влаги из продукта складывается из конвективного (J_K), термодиффузионного (J_T) и бародиффузионного (J_B) потоков при соответствующих коэффициентах массоотдачи ($\beta_K, \beta_T, \beta_B$) поверхностях фазового контакта (F_i, F_{K_i}, F_{B_i}) и разности парциальных давлений ($\Delta P_P, \Delta P_T, \Delta P_B$).

$$J = J_K + J_T + J_B = \beta_K F_i (\Delta P_P) + \beta_T F_{K_i} (\Delta P_T) + \beta_B F_{B_i} (\Delta P_B) \quad (15)$$

На границе продукта и ленты транспортера ($y = y_{\text{Л}}$) происходит теплообмен при граничных условиях IV рода:

$$\lambda_{\text{П}} \left(\frac{\partial t_{\text{П}}}{\partial y} \right) + \lambda_{\text{Л}} \left(\frac{\partial t_{\text{Л}}}{\partial y} \right) = 0 \quad (16)$$

Аналогично при контакте ленты с корпусом ($y=0$):

$$\lambda_{\text{КЭ}} \left(\frac{\partial t_{\text{К}}}{\partial y} \right) + \lambda_{\text{Л}} \left(\frac{\partial t_{\text{Л}}}{\partial y} \right) = 0 \quad (17)$$

Поскольку, этот теплообмен проходит при наличии контактного термического сопротивления ($R_{\text{ТК}}$), то используется значение эффективного коэффициента теплопроводности:

$$\lambda_{\text{КЭ}} = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_{\text{Л}}} + R_{\text{ТК}}} \quad (18)$$

При наличии слоя тепловой изоляции:

$$\frac{\partial t_{\text{И}}}{\partial \tau} = a_{\text{И}} \left(\frac{\partial^2 t_{\text{И}}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_{\text{И}}}{\partial y^2} \right), \quad \tau > 0 \quad (19)$$

условия однозначности

при $\tau = 0, \quad t_{\text{И}} = t_{\text{ос}},$

Влияние окружающей среды:

Теплообмен между изолированной поверхностью сушилки и окружающей средой проходит при ГУ III рода:

$$\lambda_{.И} \left(\frac{\partial t_{И}}{\partial y} \right) + \alpha_c (t_{OC} - t_{И}) = 0 \quad (20)$$

Замыкают систему уравнений зависимости теплофизических свойств продукта, воздуха, ленты, изоляции от температуры

$$\lambda_{П} = \lambda(t_{П}, U_{П}); \quad \lambda_{В} = \lambda(t_{В}, X_{В}); \quad \lambda_{Л} = \lambda(t_{Л}); \quad \lambda_{И} = \lambda(t_{И}) \quad (21)$$

$$a_{П} = a(t_{П}, U_{П}); \quad a_{В} = a(t_{В}, X_{В}); \quad a_{Л} = a(t_{Л}); \quad a_{И} = a(t_{И}) \quad (22)$$

$$\rho_{П} = \rho(t_{П}, U_{П}); \quad \rho_{В} = \rho(t_{В}, X_{В}); \quad \rho_{Л} = \rho(t_{Л}); \quad \mu_{В} = \mu(t_{В}, X_{В}); \quad D = D(t_{П}) \quad (23)$$

Основные проблемы с практической реализацией математической модели (7...23) связаны с выражениями (10) и (15). Это предопределяет необходимость привлечения методов теории подобия и формирования адекватной модели в обобщенных числах подобия.

Гидродинамическую ситуацию в воздушном канале сушилки можно представить классическим числом Рейнольдса: $Re = v l_i \rho \mu^{-1}$.

Для оценки влияния мощности электромагнитного излучения на кинетику сушки в [1] предложено число энергетического воздействия, которое показывает соотношение поглощенной продуктом энергии N_{Σ} к той энергии, которая необходима для перевода в пар всей удаляемой влаги:

$$Bu = N_{\Sigma} (\gamma G_U)^{-1} \quad (24)$$

Число Bu в приближении к 1 характеризует «идеальную» тепловую сушку, где вся подведенная к продукту энергия расходуется только на перевод влаги в пар. Вместе с тем, эффективная организация бародиффузионных процессов позволяет часть влаги удалять в виде тумана [1]. Таким образом, число Bu может служить мерой бародиффузионного переноса влаги.

Расчет коэффициентов массоотдачи β проводится на основе уравнений в обобщенных переменных, как зависимость числа Шервуда от чисел Рейнольдса и Шмидта. Тогда для условий сушки в неподвижном слое можно рекомендовать уравнение в обобщенных переменных:

$$Sh = A Re^n Sc^m Bu^k \quad (25)$$

Для ленточных сушилок более перспективным может стать обобщение с применением массообменного числа Стантона:

$$St_m \equiv \frac{\beta}{w} = A Re^h Sc^p Bu^q \quad (26)$$

Константы в уравнениях (25, 26) определяются при обработке массивов экспериментальных данных.

Числа Шервуда и Стантона представляют собой две различные безразмерные формы коэффициента массоотдачи. Каждая из этих форм имеет свои преимущества. Число Шервуда не содержит режимных параметров, но в его состав входят характерный размер системы и коэффициент диффузии.

Число Стантона непосредственно связано с диффузионным сопротивлением, оно не зависит от представления о пристенном пограничном слое как области действия молекулярного механизма массопереноса. Представляется, что число St более характерно при анализе кинетики процессов сушки с бародиффузионным переносом влаги.

Предлагаемый подход позволит рассчитывать кинетику сушки при известных режимных параметрах и структурных характеристиках продукта, обосновывать и оптимизировать процессы сушки при электромагнитном подводе энергии к продукту.

Литература

1. Бурдо О.Г. Эволюция сушильных установок – Одесса: Полиграф, 2010 – 368с.
2. Лыков А.В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 472 с.
3. Рудобашта С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой. М.: Химия, 1980. 248 с.
4. Акулич П.В. Термогидродинамические процессы в технике сушки/Минск: Институт тепло- и массообмена им. А.В.Лыкова НАНБ, 2002.-268с.
5. Луцик П.П. Массопроводность деформируемого в процессе сушки твердого пористого тела //Промышленная теплотехника. 1987. Т.9, №5. С.29-34.
6. Лонцин М., Мерсон Р. Основные процессы пищевых производств: пер. с англ. М. 1983. – 384 с.